

平成23年度 修士論文

液晶を用いた波長フィルタに関する研究

指導教員 花泉 修 教授

群馬大学大学院工学研究科

電気電子工学専攻

陳 静

# 目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的・概要	2
1.3 本論文の構成	5
第2章 HPDLC を用いた波長フィルタの原理	6
2.1 はじめに	6
2.1.1 液晶について	6
2.1.2 配向の光学的性質	8
2.2 HPDLC に関する理論	9
2.2.1 HPDLC について	9
2.2.2 使用装置と材料について	13
2.2.3 HPDLC の作製方法	16
2.2.4 液晶濃度と温度により回折効率の変化	17
2.2.5 HPDLC を用いた波長可変フィルタの設計構成と原理	19
2.3 まとめ	23
第3章 HPDLC を用いた波長フィルタに関する研究	24
3.1 HPDLC を用いた回折型光スイッチの作製	24
3.1.1 はじめに	24
3.1.2 試料の構造及び作製	24
3.1.3 実験系の設計	27
3.2 HPDLC を用いた回折型光スイッチの観察	29
3.2.1 電圧印加特性	29
3.2.2 周期構造の観察	30
3.3 HPDLC を用いた波長フィルタの評価	32
3.3.1 実験系の設計	32
3.3.2 波長フィルタの光学特性の評価方法	33

3.3.3 波長フィルタの光学特性評価結果 .....	34
3.3.4 可変波長フィルタへの応用 .....	35
3.3.5 多層膜を用いた可変波長フィルタとの比較 .....	36
3.4 まとめ .....	38
<b>第4章 結言</b> .....	<b>39</b>
謝辞 .....	40
参考文献 .....	41
付録 ホログラムと回折格子の関係 .....	42

# 第 1 章 緒言

## 1.1 研究背景

液晶は既に 100 年以上前に発見されており、現在テレビ、時計、自動車等の電子表示部など我々の身近な応用だけではなく、これまでに、高強度・高弾性率繊維等の材料系、あるいは細胞膜・DNA 等のバイオに至るまで、幅広く応用されてきた。液晶がこのように多分野において利用される背景には、配向変化がもたらす光学特性の変化と、その低消費電力動作が可能なが挙げられるが、これを利用し、光通信デバイスの材料として利用することも可能になる[1]。

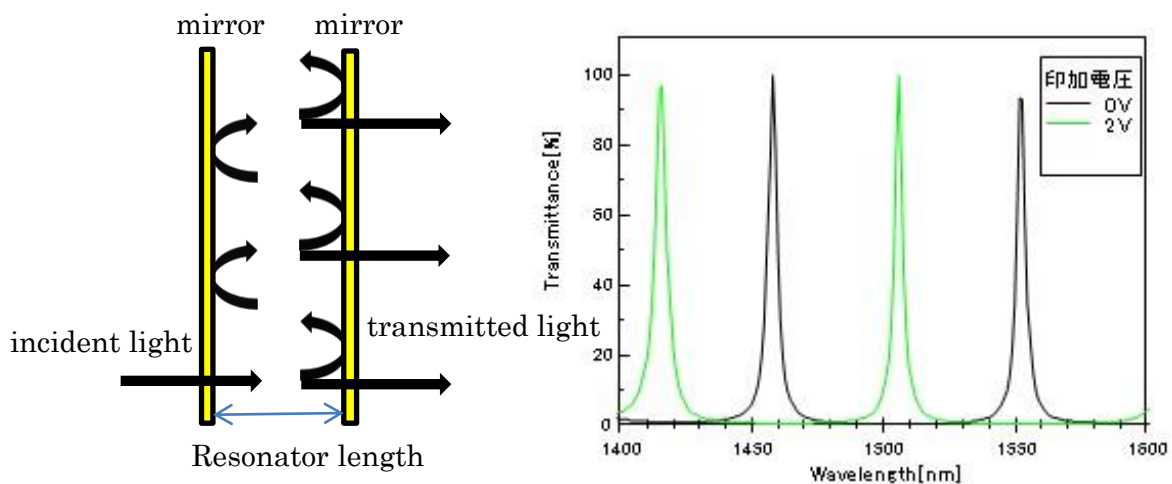
一方、光ファイバで大容量の通信を行うには、その透過波長帯をなるべく多くの情報に利用するのが効果的である。そこで、複数の波長の光源を用意し、それぞれ別々の情報で変調し、その光を一本の光ファイバでまとめて伝送して、波長多重通信方式（WDM : Wavelength Division Multiplexing）が行われる。WDM においては、複数の波長から特定の波長のみをとりだすフィルタが必要となる。液晶は電圧印加することにより屈折率を変化する。これを利用することで特定の波長を取り出せる。そこで、昨年は石英と五酸化タンタルとからなる多層膜と液晶で波長可変フィルタの作製を試みた。多層膜の作製やラビング処理など作製手順が複雑なので、本研究では、ホログラフィの高分子分散液晶に生じるホログラフィック高分子分散液晶（HPDLC : Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal）を用いて、波長フィルタと回折型光スイッチの作製を試みた。ただ、昨年作った可変波長フィルタは印加電圧により、選択透過波長がシフトするが、HPDLC を用いて作った波長フィルタは印加電圧により、屈折率差が変わるので、回折効率が変わって、透過率も変わる。これで、他の波長の光に影響せず、同じ波長の光を変調できる。

## 1.2 研究の目的・概要

本研究では液晶の電気光学性質に着目し、制御便利化、小型化が見込めるデバイスの品質・機能性の向上を目的として行っている。本論文では、液晶を用いた光デバイスである波長フィルタと回折型光スイッチについて説明する。

昨年は、石英と高屈折率、低損失材料である  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  とからなる多層膜を作製し、光通信において使用される波長 1550nm 帯においてストップバンドを持つ素子とした。これを 5  $\mu\text{m}$  のギャップで貼り合わせ、ファブリ・ペロー共振器のミラーとして利用することで、ある波長のみを透過する素子の作製をした。ギャップに液晶を注入し、電界制御によって液晶分子の配向方向を変えることで、液晶の屈折率を制御し、ピーク波長のシフトを実現した。以上のような仕組みで、波長可変フィルタが完成したが、多層膜の作製や、配向膜の成膜など、作製手順は複雑である。これに対して、HPDLC は偏向板、カラーフィルタを使用せず、ただ光の干渉に生じる光の回折現象だけで液晶と高分子の屈折率差を利用することにより高い反射率が期待でき、波長フィルタの作製が可能になる。

そのため、本研究では HPDLC を用いた波長フィルタの作製を試みた。



(a)ファブリ・ペロー共振器の概略図

(b)波長可変フィルタ特性

図 1.1 ファブリペロー共振器と液晶セルの概略図

図 1.1(a)は昨年利用したファブリ・ペロー共振器の概略図である。一定領域に特定の波長の光を定在波として閉じ込めた光の共振器は、多重干渉により非常に鋭い周波数特性をもつ干渉計となり、周波数を制御する典型的な素子として、レーザー、波長フィルタなど幅広く利用されている。ここでは共振器の中でもファブリ・ペロー共振器 (Fabry-Perot resonator) について説明する。

平行に配置されている 2 つのミラーに光が入射する場合を考える。光は反射され、2 つのミラーを透過することは出来ないと考えられるが、実際には干渉によって特定の波長の光だけ透過する。この干渉計をファブリ・ペロー共振器と言う。

ミラーに垂直に光が入射すると、2つのミラーの間で反射を繰り返す。2つのミラーの間の距離とその間の媒質の屈折率の関係から導き出される波長の光が入射すると0回反射、2回反射、4回反射・・・し、この重ね合わせの光が透過光となる。ミラーの反射率が高いほど、透過スペクトルは鋭くなる。このように特定の波長の光だけ透過させることが出来る共振器は、バンドパスフィルタとして応用ができる[2]。また、低屈折率の石英( $\text{SiO}_2$ )と高屈折率かつ低損失材料である五酸化タンタル( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )からなる多層膜を作製し、光の伝搬しない波長域(ストップバンド)を光通信において使用される波長  $1.55\mu\text{m}$  帯に設定する。これを、ファブリ・ペロー共振器のミラーとして利用することで、ある波長のみを透過する素子の作製が可能となる。ギャップに液晶を注入し、電界制御によって液晶分子の配向方向を変えることで、液晶の屈折率を制御し、ピーク波長のシフトを実現する。(図 1.1(b)参照)

HPDLC デバイスの構造と動作原理を図 1.2 に示す。HPDLC を透明電極で挟んだ構造である。HPDLC は、高分子中に直径 100nm 程度の液晶ドロプレットを分散させた。厚さ数~数十 $\mu\text{m}$ のホログラムで、光の波長程度の周期構造をなしている[3]。

入射した光は、ドロプレットにより散乱されるが、ドロプレットが周期的に分布しているため、干渉によりブラッグ条件を満たす光のみが選択反射される。

図 1.2(a)に示すように、周期構造を適当に傾けると、斜めからの照明光のうち特定の波長の光のみを観察する方向に反射させることができる。この反射状態をオン状態とする。

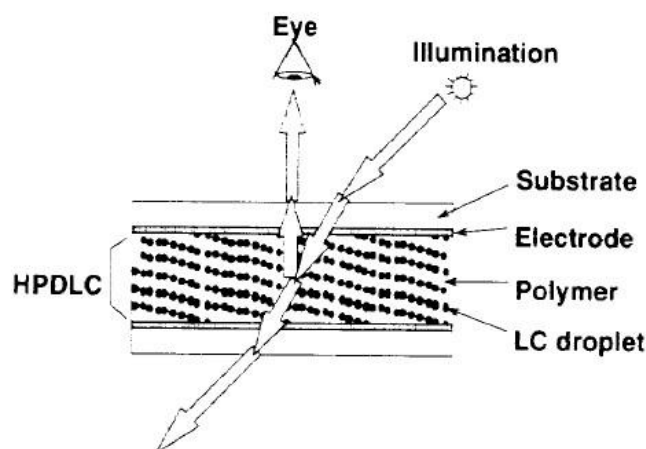


図 1.2(a) HPDLC デバイスのオン状態

図 1.2(b)に示すように、電界を加えると液晶分子の長軸が電界の方向と平行隣、高分子と液晶の屈折率差がなくなると、通常の PDLC と同様にドロプレットによる散乱がなくなり透明状態となる。反射光がなくなるので、これをオフ状態とする。

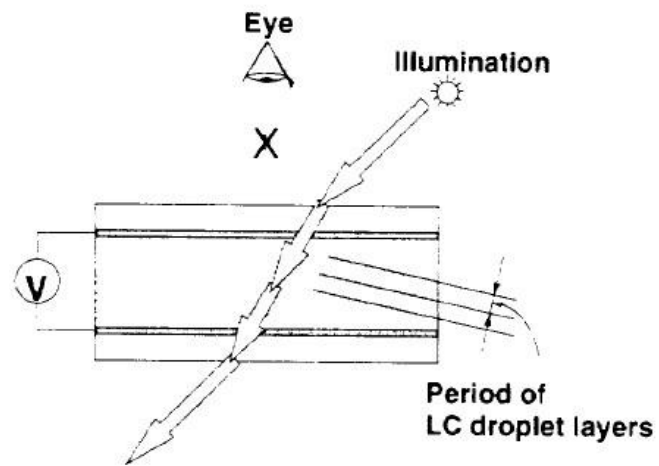


図 1.2(b) HPDLC デバイスのオフ状態

反射されない光はブラック条件を満足していないため、そのまま透過する。

### 1.3 本論文の構成

本文の構成について述べる。まず研究背景、研究目的、概要を説明する。第 2 章にて、HPDLC の構造、動作原理及び HPDLC を用いた波長フィルタの原理などを紹介する。第 3 章では、HPDLC を用いた波長フィルタに関する研究を記述してから、昨年の多層膜を用いた波長フィルタの結果との比較も説明する。最後に第 4 章において、本論文のまとめと今後の課題を述べる。



## 第2章 HPDLC を用いた波長フィルタの原理

### 2.1 はじめに

#### 2.1.1 液晶について

液晶は、液体と固体の中間の性質をもつような物質である。1988 年オーストリアの植物学者 F.Reinitzer により発現され、145.5℃で結晶から不透明液体になり、さらに、178.5℃で透明な液体になると報告されている。そして、この温度の間で、不透明な液体は複屈折性を示し、固体化する直前に虹色の輝きを示すことを見出した[4]。その後、ドイツの物理学者 O.Lehmann によって、この不透明状態が流動性をもちながら、光学的な異方性を示すことが発見された。

多くの物質では加熱時、融点で位置と配向方向の秩序は共に消失し通常の液体となるが、液晶物質は融点では直ぐに液体にならず、分子の位置の秩序は完全或いはいくつかの方向のみが失われるが、配向の秩序は残っている中間相が生じる[5]。これが液晶相である。液晶は相変化の起源から、温度変化によって液晶が形成されるものはサーモトロピック液晶、溶液濃度、温度によって形成されるリオトロピック液晶に分類される。そして、分子形状から棒状分子で形成されるもの（カラムチック）、円盤状分子で形成されるもの（ディスコチック）等に分類される。さらに棒状分子の中でも、重心位置の秩序の有無、傾きはどうかなどによって分類される。また、相状態からネマチック液晶、スメクチック液晶、コレステリック液晶などに分類される。固体、液晶、液体との関係は、表 2.1 のように表すことができる。

表 2.1 空間的な一様性の段階的消失—位置の無秩序化度合[6]

3 次元的に結晶		通常の結晶
2 次元的に結晶で、	1 次元的に液体	中間層（液晶）
1 次元的に結晶で、	2 次元的に液体	//
	3 次元的に液体	通常の液体（相）

本研究で使用する液晶 5CB（分子式は図 2.1 に示す）は細長い異方的な形状を有する有機分子のネマチック液晶で個々の分子が自由に移動できる。層状構造は存在せず図 2.2 で描かれるような形になる。液晶分子の大きさは約 0.5nm であり液晶が光学的異方性を持つため、分子よりは大きく、巨視的には十分小さい領域で配向した液晶に対して屈折率楕円は定義される。屈折率楕円体というのは、結晶中に侵入した光は、原子の規則的配列のために互いに直交する 2 つの平面波に分かれ、異なった位相速度で進む。ところで、結晶によっては入射光の角度によって屈折率が違う。3 次元で各方向に対する屈折率で図を作ると、屈折率楕円体といわれるものができる。この楕円体の中

心( $x$ - $y$ - $z$  軸の原点)を通る平面で切ると、“真円”になる角度がある。この平面(円)を含む軸を“光学軸”と言う。

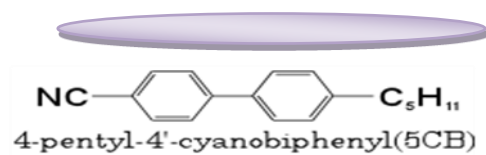
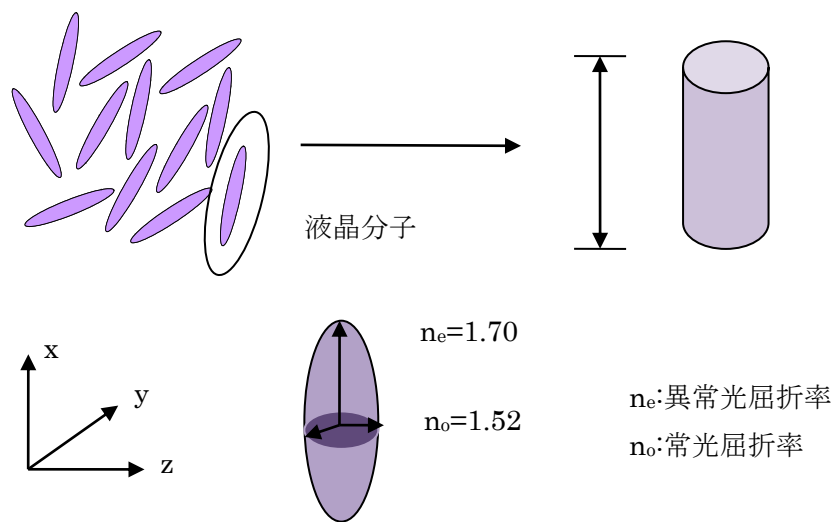


図 2.1 液晶 5CB の分子式



屈折率楕円体

図 2.2 液晶分子の概略図

### 2.1.2 配向の光学的性質

通常、液晶分子はランダムな方向を向いているが、電界を加えることにより電界の方向に対応した配向ベクトル  $\mathbf{n}$  をそろえることができる（図 2.3 参照）。

そして液晶に光を入射した際、配向ベクトル  $\mathbf{n}$  と光の電界が垂直か平行かで

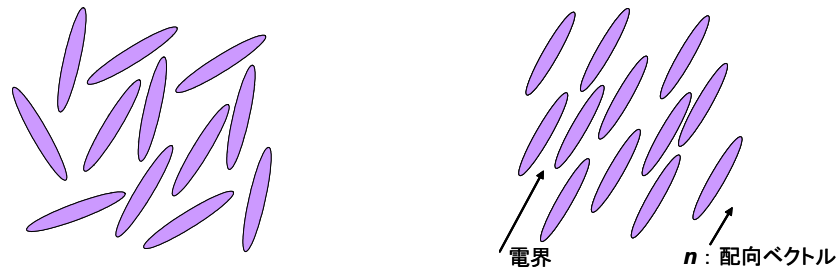


図 2.3 液晶分子の配列の概略

の屈折率は異なる。この性質を利用することで、電界制御できる光通信素子を作製することができる。なお、光が  $\mathbf{n}$  に対して平行に入射して光の電界が  $\mathbf{n}$  に対して垂直になるときの屈折率を常光屈折率  $n_o$  といい、光が  $\mathbf{n}$  に対して垂直に入射して光の電界が  $\mathbf{n}$  に対して平行になるときの屈折率を異常光屈折率  $n_e$  という[7]。

なお、液晶に印加する電圧は交流である（文献値は 100Hz だけど、本研究では利用した電圧源の一番の最大値 550Hz の矩形波を選択した）。これは、直流電圧をかけると電気化学反応が起き、使用できなくなってしまうためである[8]。

## 2.2 HPDLC に関する理論

### 2.2.1 HPDLC について

高分子分散型液晶（PDLC）及びホログラフィーを組み合わせることによって生じる HPDLC は 1990 年から幅広い注目されている光学素子である[9]。これにより生じる HPDLC 回折格子は PDLC がレーザー干渉光を調整可能な光学の装置のための新しい複合材料として出現した。HPDLC は、ホログラム記録の手法により形成した周期的に液晶層と高分子層が積層した構造で、層間の屈折率を利用して動作する回折格子である。従来のホログラムと異なり、電界で特性が制御できるホログラムである。選択反射波長はその格子間隔に依存する。光の干渉により回折だけを利用するので、カラーフィルタや偏光板を必要とせず、光の回折現象だけを利用し、高反射率、高色純度が期待できる。HPDLC 素子の形成構造をした図 2.4 に模式的に示す[10]。

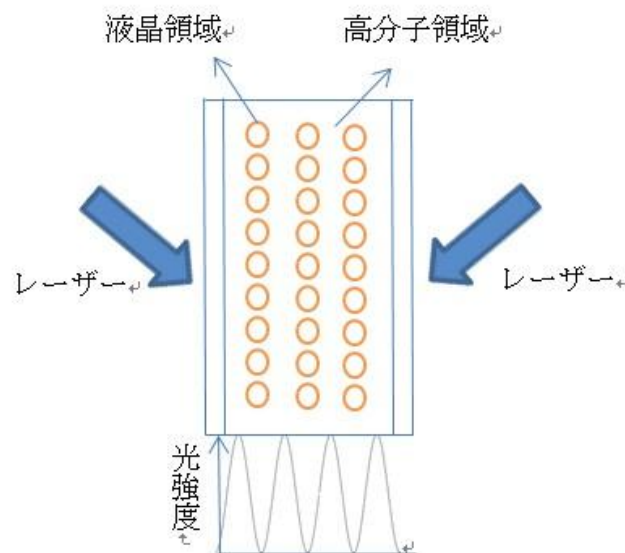


図 2.4 HPDLC の形成構造

動作原理としては、HPDLC 素子は、液晶層と高分子層が周期的に繰り返された構造を有し、両層の屈折率の差を利用して動作する。高分子層の屈折率は液晶の常光屈折率になって、電圧無印加時には液晶層と高分子層間に屈折率差があるため、層の周期に依存した特定波長の光を選択的に反射する。電圧印加時には、液晶が配向方向を変え、液晶層と高分子層の屈折率が一致するため、反射光が消失し、透明状態となる。HPDLC 素子は二つのレーザー光を干渉照射することにより作製することができ、素子の選択反射波長は照射レーザー光の波長及びレーザー光線の交差角度により制御することができる。

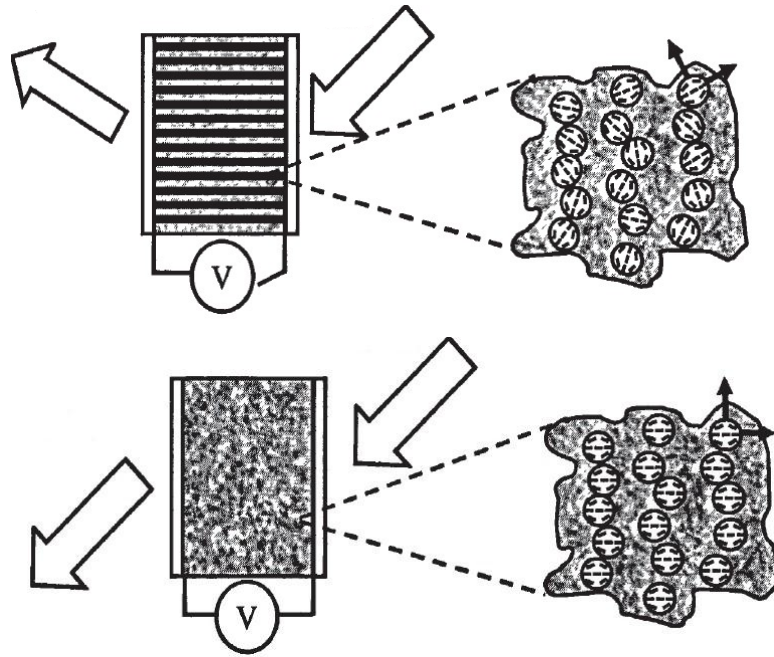


図 2.5 HPDLC と PDLC の構造図[11]

これから HPDLC に関する回折格子、ホログラムについて説明する。(回折格子とホログラムの関係は付録参照)

#### 1、回折格子：

回折格子は、種々の波長が混ざった光(白色光)を波長ごとに分ける(分散)光学素子である。最も単純な回折格子は、多数の平行スリットが等間隔で配列した構造をしている。光が回折格子に入射すると、波長ごとに決まったある角度で光が強め合い(回折)、この強め合った光を取り出すことで波長選択ができる。すなわち、図 2.3 のようにN個の多数のスリットが等間隔  $d$  で並んでいるとする。隣り合う開口に入射した平行光線について、その光路差が波長の整数倍になるとき光は強めあう。回折格子を回折だけでなく分光器として WDM (波長分割多重) 技術に使用することにより大容量通信に対応することが可能である。回折格子は透過型と反射型という2種類がある。図 2.3 に示すように、回折格子の大きさ  $L$  は  $L = Nd$  である( $N$ は回折格子の周期数)。隣りあうスリット間の光路差は  $d\sin\theta$ 、この光路差が波長のちょうど整数倍になるとき明線ができ、波長の整数倍に半波長足したようになるとき暗線ができるので、明線の条件は  $d\sin\theta = m\lambda$ 、暗線の条件は  $d\sin\theta = (m + \frac{1}{2})\lambda$  ( $m=0,1,2,\dots$ ) である。図の赤い線は左から入射光と回折光で、角度  $\theta$  は入射光と回折光の成す角である。

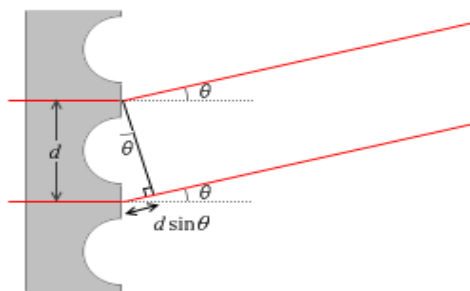


図 2.6 回折格子

## 2、ホログラム：

干渉によって位相情報を記録したものをホログラムと呼んでいる。ホログラムの記録には、基準となる参照波と物体波の干渉を利用する。記録材料の厚さにより、薄いホログラムと厚いホログラムに分ける。この二つの区別は、一般的に次式によって定義されるパラメーター $Q$ に基づいてなされる。

$$Q = \frac{2\pi\lambda L}{n(d)^2}$$

この公式の中で、 $\lambda$  は記録光源の波長で、 $L$  は干渉縞の厚さで、 $n$  は媒質の平均屈折率で、 $d$  は干渉縞の周期である。 $Q > 10$  の大きな値が体積格子(厚い格子)に対応し、 $Q < 1$  の小さい値が薄い格子に対応する[12]。これから相分離によるホログラム形成過程について説明する。レーザー光源による二光束干渉露光系を用いて、媒質中に露光を行う。二光束干渉露光により干渉縞が形成される。この二光束干渉露光により、干渉縞の明部において高分子の光重合反応が始まる。この時、硬化収縮が起こって密度差が生じ、隣接する重合性高分子が明部に移動し更に重合が進行する。それと同時に明部に存在していた液晶が暗部に向かって析出されることで相分離が起こる。このとき液晶分子が移動して行く際に高分子鎖との相互作用で液晶分子長軸を移動方向に配向させようとする力が働くと考えられる[13]。すなわち、相分離過程において干渉縞の間隔方向に液晶分子を配向させようとする力が働くと考えられる。最終的には、干渉縞の明暗のピッチに対応して高分子層と液晶層の周期構造が形成され、液晶層の配向ベクトルが干渉縞の間隔方向を向いた状態が得られると考えられる。

液晶部全体の常光屈折率  $n_o$  と高分子部の屈折率  $n_p$  がほぼ一致するように液晶の種類と高分子の種類を組み合わせを適宜設定するなら、 $s$  偏光の入射光に対しては液晶層全体の常光屈折率と高分子層の屈折率の差を感じないため回折せず、 $p$  偏光の入射光に対しては液晶層全体の異常光屈折率と高分子層の屈折率差を感じて回折するような偏光選択性ホログラムができると考えられる。

薄いホログラムでは、一般に真の像と共役像がともに再生され、また薄い位相ホログラムではさらに高次の回折像に相当する多くの像が再生される。一方、厚いホログラムの場合は、真の像あるいは共役像のいずれか一方の像しか再生されない。

薄いホログラムの場合、回折は通常の平面回折格子の場合と同じで、波長により回折の方向が異なる。これに対し厚いホログラムでは干渉縞がホログラムの中に三次元

的に記録されており、縞からの反射光の多重干渉により再生光の角度選択性、波長選択性が優れている。回折はちょうど結晶のX線回折と同じようにブラッグの条件に従う。

透過型ホログラムの場合、ホログラムの厚みが増すほど回折される光の角度範囲が狭くなって角度選択性がよくなる。一方、反射型ホログラムの場合は必然的に厚いホログラムであり、干渉フィルタと同じ作用により回折される光の波長幅が狭く、白色光で再生することができる。厚い位相ホログラムはこれらの特性に加えて再生像が明るく、種々の応用分野に使われている重要なホログラムである。

厚いホログラムの回折効率の計算は薄いホログラムと異なり、少し複雑である。これは、再生は一層の格子による普通の回折ではなく、多層格子によるブラッグの反射と呼ばれる回折が起こるためであって、吸収のない位相ホログラムでは100%に近い回折効率を実現することができる。このことは、薄いホログラムに比べて圧倒的に有利な条件であるため、ディスプレイ用ホログラムなどの特殊なホログラフィック光学素子に使われている[14]。

ホログラムは通常レーザー光で記録と再生される。ホログラムは一種の回折格子であり、回折光の方向は波長によって異なる。したがってホログラムを白色光で再生した場合、各波長による再生像がずれて重なってしまい、結局ぼけた像しか得られない。レーザ光は完全な単色であり、光が二つに分けて再び重ね合わせた時のみ、時間的に空間的にも安定した干渉縞が得られるためである。再生像のぼけがなく奥行きのある深い三次元像をほぼ完全な形で再生できる。そのため、干渉計測においては殆どレーザ光再生ホログラムが使われる。また奥行きのある深い特殊な三次元像のディスプレイにも利用される。ただし、レーザ光再生では像にスペックルとよばれる細かい斑点模様が現れる。これは再生像がちらついて見える現象で、レーザ光が干渉性のよい光であるために生じるものである。

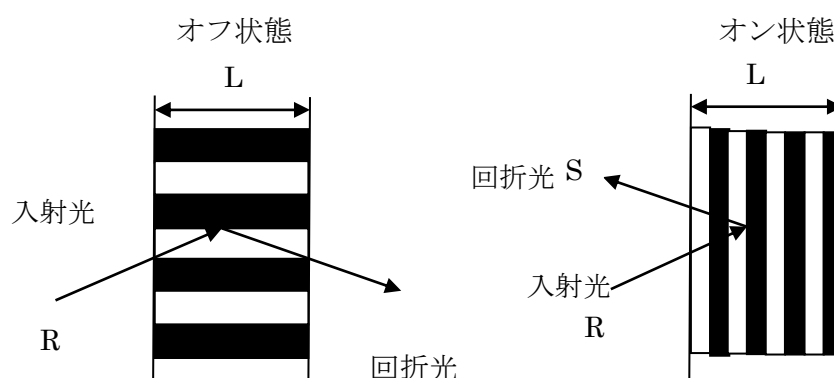


図 2.7 透過型と反射型のホログラム

## 2.2.2 使用装置と材料について

本研究では、ヘリウムネオンレーザー (He-Ne レーザー) を光源として、実験をした。あと、基板セルに注入する混合物は低分子液晶 5CB (Wako), フォトポリマー NOA65 (Norland) と増感剤ローズベンガル (RB) (Aldrich) 或いはクリスタルバイオレット (CV) (Aldrich) で作った。これらのものを使用理由について説明する。

### 1、He-Ne レーザー

本実験で、発振波長 633 nm で、出力が 18 Mw までの He-Ne レーザーを利用した。He-Ne レーザーは小出力で連続発振する最も代表的なレーザーである。各種のレーザーの中で He-Ne レーザーは、指向性、単色性、安定性など、出力光ビームの特性がとくに優れているので、レーザー計測、レーザープリンター、波長標準、光学機器の調整などに使われている。単純なホログラフィー記録システムでは、He-Ne レーザーがよく用いられる。それが安価で、多くの写真乳剤のピーク感度とよく一致する 633nm の単一スペクトル線で動作する[15]。

### 2、低分子液晶 5CB

5CB は TN 型液晶でよく用いられる液晶物質である。5CB などの TN 型液晶に用いられる液晶分子は、「複屈折性」「誘電異方性」と呼ばれる 2 つの性質をもっている。この液晶分子は、分子の長軸方向と同じ向きの振動面を持つ偏光の進行速度に影響を与えるため、短軸方向に振動面を持つ偏光と進行速度が異なる。その結果、液晶分子の層を通過した光は偏光の振動面の違いにより 2 つの像が観察できる。また、この液晶分子は、長軸方向と短軸方向の誘電率の差が大きい。そのため、電圧を印加することにより一定の方向へと向きをそろえる。これを誘電異方性と呼ぶ。5CB の場合は、長軸方向の誘電率が単軸方向に比べて非常に大きく、電圧印加することにより、電場の方向に長軸方向が向くことになる。

### 3、フォトポリマー NOA65

光が照射すると、硬化のための一般的な材料の混合物はフォトポリマーを使う。この中、NOA65 は広く使用されている NOA シリーズの中で最も一般的なものである。光学部品の接着のための NOA65 は独自の UV のイニシエーターがあり、開始剤の添加により、大幅に強化する回折効率の材料系のようなメリットを持って、COM-アクリル系に比べが小さく収縮、よりは安定した電気光学特性、そして長期的な安定性も持つので、本実験で NOA65 を利用して実験をした。

### 4、増感剤ローズベンガル (RB) 或いはクリスタルバイオレット (CV)

増感剤を使用することによって赤い光でも記録できる。



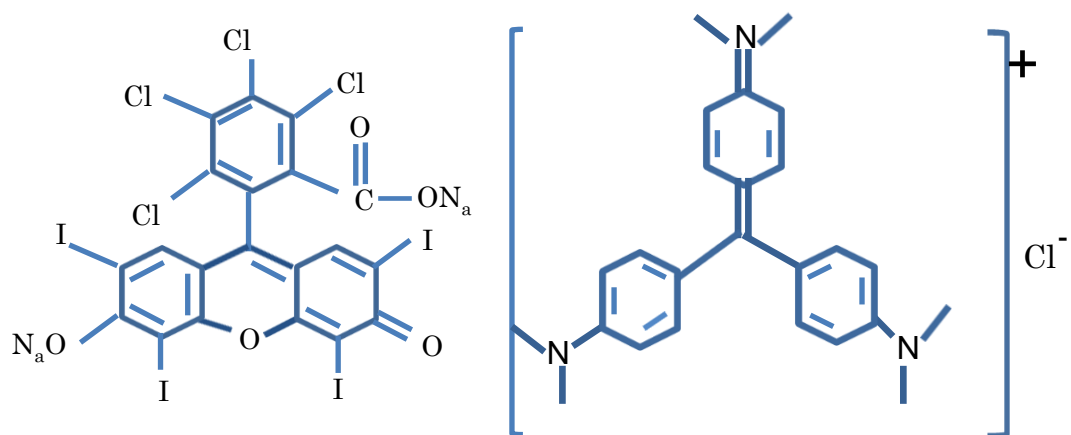


図 2.8 ローズベンガル(RB)とクリスタルバイオレット(CV)の分子式

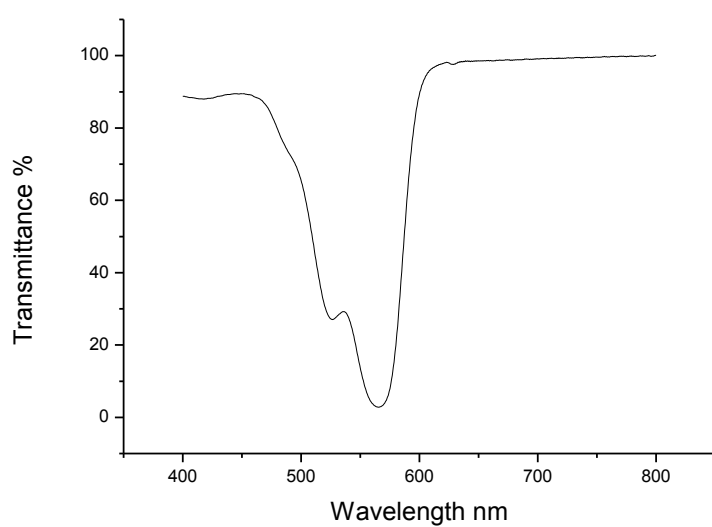


図 2.9a 増感剤 RB の吸収波長スペクトル

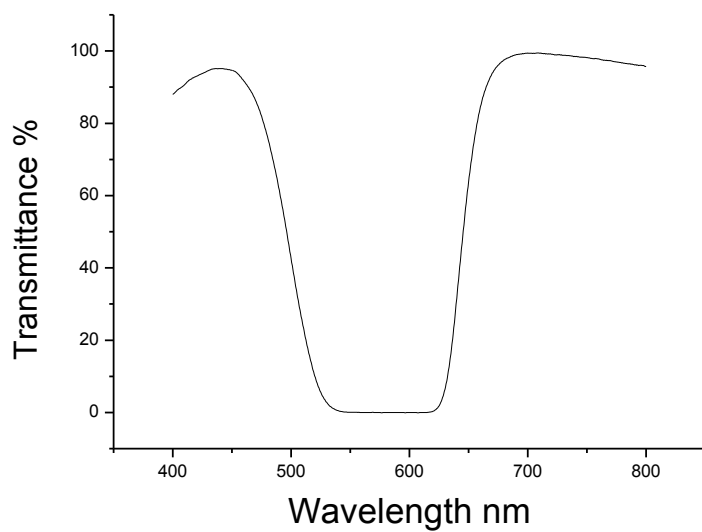


図 2.9b 増感剤 CV の吸収波長スペクトル

上の二つのグラフは液晶 5CB、フォトポリマーNOA65 と増感剤 RB あるいは CV を混合したものを分光光度計で測定した。測定計は図 2.10 に示す。

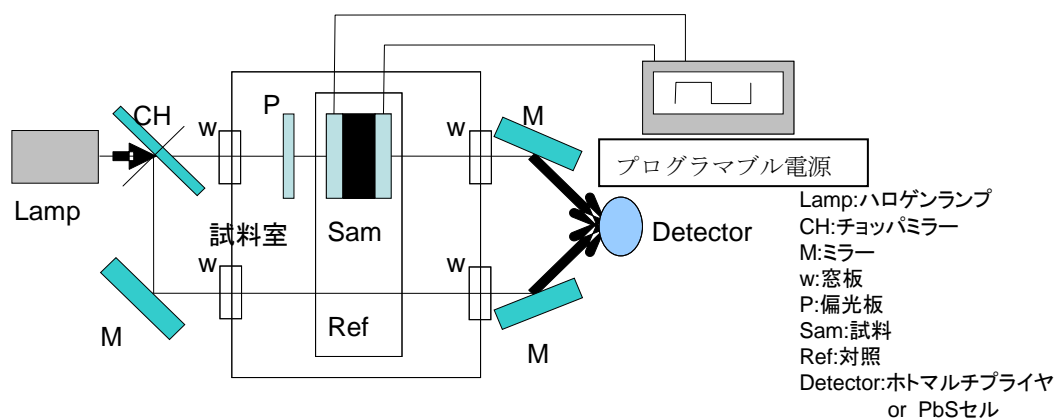


図 2.10 増感剤の吸収スペクトル測定系

増感剤としては、増加量が少なすぎる場合には高分子と液晶の相分離が起こり難くなり、必要な露光時間が長くなってしまふ。逆に、増感剤が多すぎる場合には高分子と液晶の相分離が不十分な状態で硬化してしまうため、高分子中に多くの液晶分子が取り込まれ、偏光選択性が小さくなるという問題がある。

増感剤を選ぶ時、以下の二つの条件を考えなければならない。一つはこの増感剤は短波長側の記録光に大きい吸収係数が持っている。こうしたら、光電効果により、媒質中記録光波の振幅情報と位相情報が体積ホログラム格子に形成する。もう一つは、この増感剤は再生光に対して吸収が小さい。でないと、光の損失により回折効率が低下する。元は超長距離通信用光波長 1550nm を選択反射波長としたいが、実験では、プリズムを使用しなければならないので、今回原理実証として、700nm の波長を選択反射波長にする。増感剤 CV と RB の吸収波長スペクトルから見ると、700nm の波長の光が照射すると、透過率がほぼ 100%になるので、最大の回折効率ができると考えられる。

### 2.2.3 HPDLC の作製方法

HPDLC デバイスの作製方法を図 2.11 に示す。液晶と光重合性の高分子前駆体を重合させ、溶けきれなくなった液晶を干涉縞の節の部分に析出させる。すなわち、レーザー光の干涉縞を記録することにより、HPDLC デバイスを作製する。

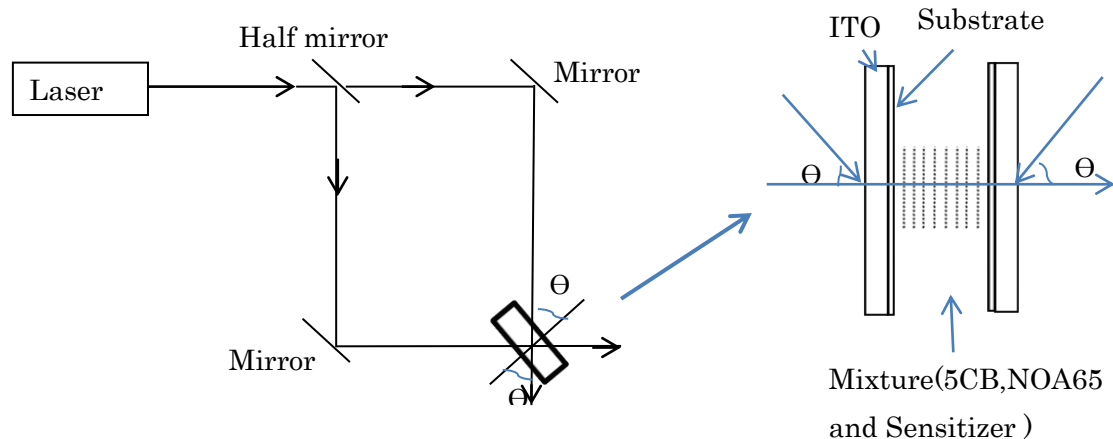


図 2.11 HPDLC の作製方法

本研究では、液晶 5CB, フォトポリマーNOA65 と増感剤を一定の重量比に混合した混合物を 2 枚の基板で挟んだ試料を干涉の実験をしてから、HPDLC の作製が完了する。反射波長はブラック条件で決定される。照明光の照射方向と観察方向を固定すれば、反射波長は周期構造のピッチのみで決まる。従って、反射波長は周期構造のピッチを変えることで制御できる。

## 2.2.4 液晶濃度と温度により回折効率の変化

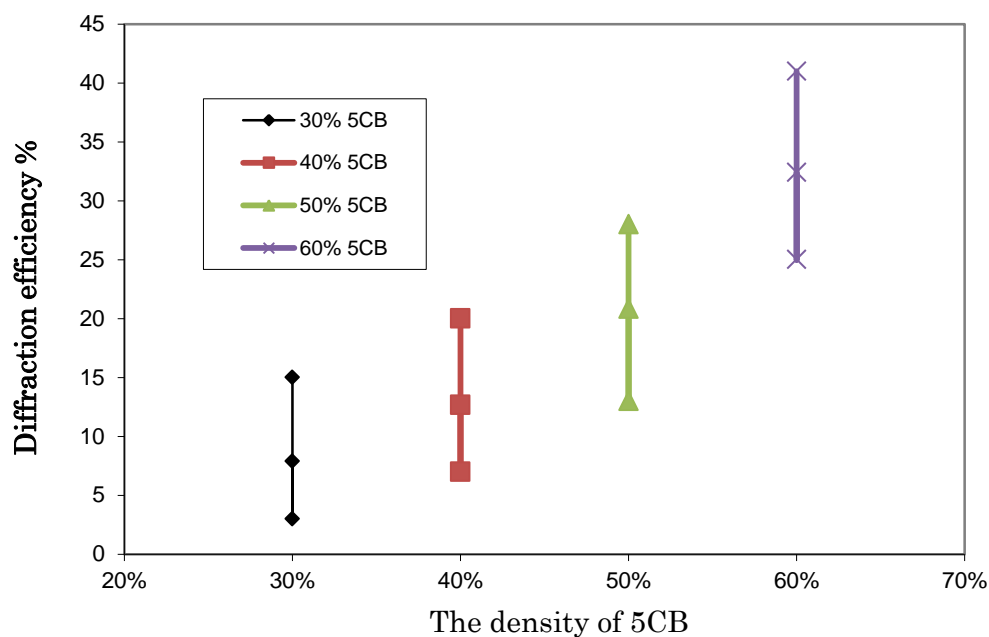


図 2.12a 液晶濃度により回折効率

図 2.12a は温度、照射強度や照射時間などの条件が同じな時、液晶濃度は 60%、50%、40%と 30%の時、それぞれの試料の七個位置で、PDL C が回折格子を形成する途中記録した回折効率である。この表を見ると、ある程度の範囲内で、液晶濃度が高いほうが回折効率も高い。原因としては、もし液晶濃度が低いなら、相分離が不十分で、液晶領域で高分子も存在するので、液晶領域と高分子領域の屈折率差が小さくなって、回折効率も低下すると考えられる。

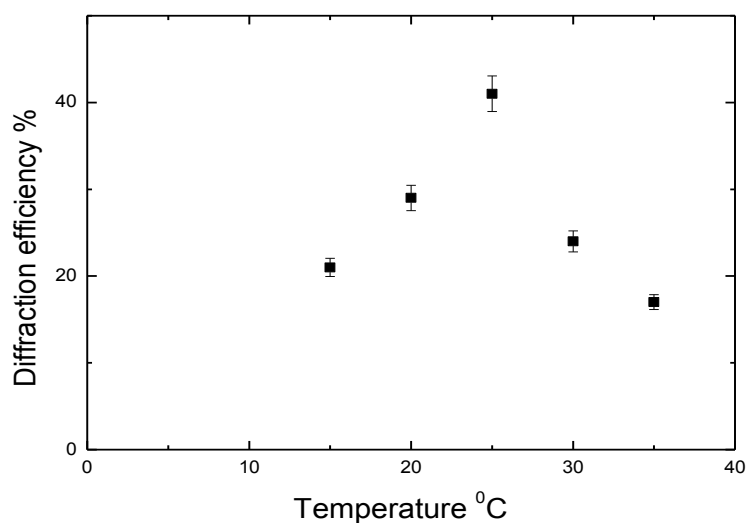


図 2.12b 温度により回折効率

図 2.12b は液晶の濃度は 60%の時、同じ位置で 15℃、20℃、25℃、30℃と 35℃の時の回折効率変化グラフである。このグラフから見ると、相分離温度が上昇することで液晶の析出量が増加して、素子内の実効的な屈折率周期構造の屈折率差が大きくなったためと考えられる。この結果から相分離温度が液晶の析出量を決定して（実効的な屈折率差を決める）、高回折効率の HPDLC を作製するには相分離温度が高い（室温）混合物が必要であることがわかった。また、35℃のとき、回折効率が低下する原因としては、液晶 5CB の相転移温度は 35.65℃なので、35℃ぐらいの温度になったら、液晶が液体になって、相分離が起こりにくくなると考えられる。

## 2.2.5 HPDLC を用いた波長フィルタの設計構成と原理

WDM 通信システムでは、アレイ導波路型波長フィルタ (AWG)、ファイバブラッググレーティング (FBG)、薄膜フィルタなどの波長フィルタが用いられている。近年、体積ホログラム (屈折率格子) を用いるホログラフィック波長フィルタは、複数の屈折率格子を単一の素子内に形成することで多数の信号光を同時にフィルタリングできるため、素子のサイズ面での優位性を持っており、加えて狭帯域を実現できる波長フィルタとして注目を集めている。

まず、多層膜を用いた波長フィルタの作製について簡単に説明する。多層膜の設計原理としては、多層膜の透過シミュレーションとして、光ファイバ通信でよく使われる波長帯  $\lambda=1.55\mu\text{m}$  を、透過せずに反射するストップバンドに設定した。ブラッグ反射により光の伝搬が禁止されることから、そのストップバンドを考えることができる[16]。

屈折率  $n_1$ 、厚さ  $d_1$  の膜と、 $n_2$  と  $d_2$  の膜が周期的に積層された構造において、光が伝搬しない条件は

$$k_1 d_1 + k_2 d_2 = \pi \quad (2.1)$$

とあらわせる。そして、

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i \quad (i=1,2) \quad (2.2)$$

であるので

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 + \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 = \pi \quad (2.3)$$

となり、式(2.3)を

$$\begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 = \frac{\pi}{2} \\ \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.4)$$

とわけられ、そして光学膜厚は

$$\begin{cases} d_1 = \frac{\lambda}{4n_1} \\ d_2 = \frac{\lambda}{4n_2} \end{cases} \quad (2.5)$$

となる。

したがって、 $\lambda = 1550\text{nm}$  として、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  の屈折率を  $n_1$  とすると  $n_1=2.11$  ( $\lambda=1550\text{nm}$ )、 $\text{SiO}_2$  の屈折率を  $n_2$  とし  $n_2=1.45$  ( $\lambda=1550\text{nm}$ ) と置く。すなわち  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  の厚さ  $d_1$  と、 $\text{SiO}_2$  の厚さ  $d_2$  はそれぞれ、 $184\text{nm}$ 、 $267\text{nm}$  と求められる。したがって、多層膜におけるそれぞれ膜厚を式(4-2.5)で求めた値で作製すると、波長  $1550\text{nm}$  付近で、光の透過はなくなり、ミラーのように反射が起きると考えられる。設計にお

けるシミュレーション及び作製においてこの値を用いた。

本研究でも同じ原理なので、干渉縞の間隔  $d$  をブラッグ条件によって、 $488\text{nm}$  になる。 $d$  をこの数値に設定して、透過型の回折格子を作って、ブラッグ回折を起こるかどうかなを確認する実験をする。もし起こるなら、波長フィルタができると考えられる。

この時、 $d = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$  によって、 $\theta$  は  $44.6^\circ$  になる。これを実験系に設定して、干渉の実験をする。結果として、ブラッグ回折が起こった。ブラッグ回折の写真は図 2.5 に示す。



図 2.13 ブラッグ回折写真

図 2.9 は透過型の回折格子をつくってから、ブラッグ回折写真である。記録光は  $633\text{nm}$  の He-Ne レーザーを選択して、再生光は  $1550\text{nm}$  の光を選択する。左の写真は 2 つの光が干渉する時一つの光の透過光で、右の写真は何分間後、この 1 つの光をカットしても、ブラッグ回折により、光も出る。ブラッグ回折が起こることを確認した。確認してから反射型の回折格子を作って、波長フィルタを作る。

これから反射型の回折格子の入射角の計算を説明する。

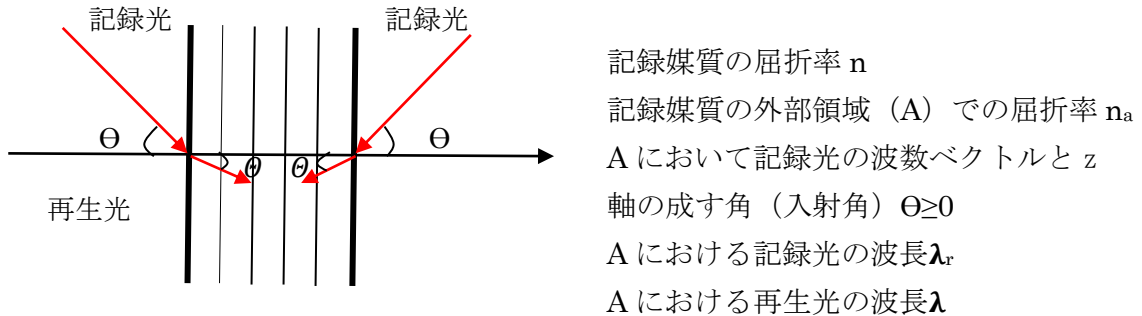


図 2.14 記録と再生時の角度図

この時、A を空気 (真空) と考え、 $n_a \equiv 1$  とする。 $\lambda \equiv 700\text{nm}$  とすると、ブラッグ条件により、格子周期  $d$  は

$d = \lambda / 2n = 700 / 2 \times 1.6$  となる。ここで、 $n$  は格子の平均屈折率と考える。

今、記録媒質中で記録光の波数ベクトルと  $z$  軸の成す角を、図のように  $\theta (>0)$  とすると、

$$d = \lambda / 2n \cos \theta$$

になる関係から、

$$\theta = \cos^{-1}(633/700)$$

と求められる。ここで、

$$n_a \sin \theta = n \sin \theta$$

が成り立つことから、

$$\theta = \sin^{-1}(1.6 \times \sin \theta) = 42.7^\circ$$

とすればよいことが分かる。

本実験の目的は光通信でよく使われる 1550nm を選択反射するが、もし選択反射波長は 1550nm なら、上の計算により、入射角の正弦値は 1 より大きいので、実験で実現できない。この場合、媒質と同じ屈折率のプリズムを利用したら、スネルの法則により簡単に実現できるので、実験でプリズムを利用すればよいと考えられる。しかし、プリズムの様々な条件を考えなければならないので、本実験では工程の簡単化のため、原理実証として他の波長の光を選択反射することにする。

電圧を印加する時、印加電圧の数値が大きくしたら、液晶層の屈折率は段々常光屈折率になり、高分子層との屈折率差が小さくなるので、回折効率が小さくなる。すなわち、回折効率が電圧制御できると考えられる。

体積反射型位相格子のブラッグ角での回折効率は、以下の関係によって与えられる。

$$\eta = \tanh^2(\pi n_1 d / \lambda \cos \theta_0)$$

ただし、 $\Phi = \pi n_1 d / \lambda \cos \theta_0$  で、 $n_1$  は屈折率変化の振幅、 $d$  は干渉縞の厚さ、 $\lambda$  は光源の波長、 $\theta_0$  は入射角である。図 2.7 に示すように変調パラメータ  $\Phi$  の値が増加すると、回折効率は上限の 1.00 に向かって単調に増加する。

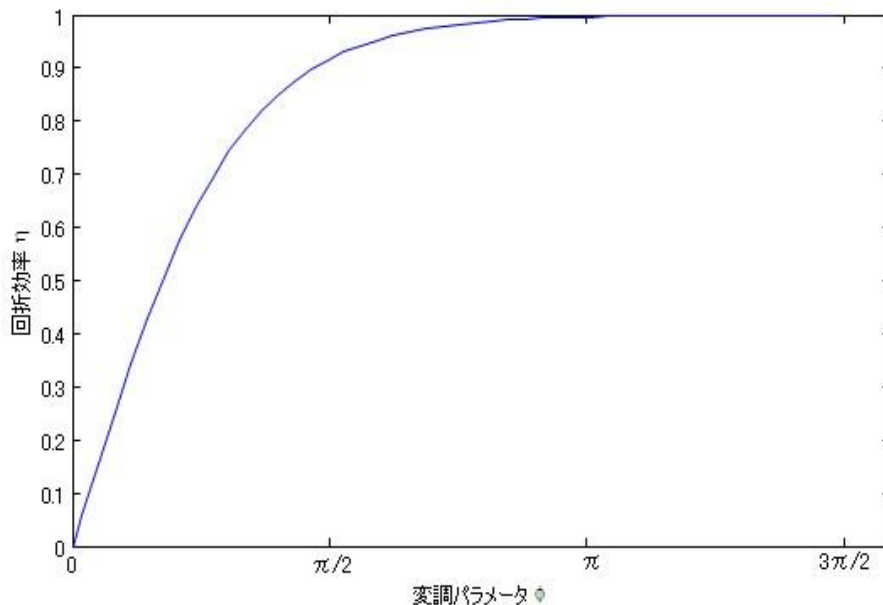


図 2.15 変調パラメータによる体積反射型ホログラムの回折効率変化図



図から見ると、変調パラメタが増えるとき、体積反射型ホログラムの回折効率は段々1になる。それに、公式によって、他の条件が一定の時、干渉縞の厚さが増えたら、回折効率が大きくなる。それで、波長フィルタを作る実験の時、スペーサーが15  $\mu\text{m}$  の時回折効率は50%なので、結局50  $\mu\text{m}$  のフィルムスペーサーを利用して、実験をした。

## 2.3 まとめ

本章では、まず液晶の分子式、構造や液晶の配向の光学の性質について説明した。

液晶は、液体と固体の中間の性質をもつような物質である。電圧を印加しない時、配向方向はランダムであるが、電圧を印加するとき、電界との方向に向いて配向する性質がある。それに、液晶は複屈折率があるので、電圧を印加すると、異常光の屈折率は段々常光の屈折率になる。これで、液晶を用いて電圧制御可能な光デバイスの作製が可能だと言われる。

次、HPDLC に関する理論と HPDLC を用いた波長フィルタの設計構成と原理について説明した。HPDLC は、ホログラム記録の手法により形成した周期的に液晶層と高分子層が積層した構造で、層間の屈折率を利用し動作する回折格子である。従来のホログラムと異なり、電界で特性が制御できるホログラムである。選択反射波長はその格子間隔に依存する。光の干渉に生じる回折だけを利用するので、カラーフィルタや偏光板を必要とせず、高反射率、高色純度が期待できる。液晶層と高分子層の屈折率差を利用して、複数の屈折格子を単一の素子内に形成することで多数の信号光を同時にフィルタリングできるため、波長フィルタとして注目を集めている。

また、回折効率を向上するため、液晶の濃度と温度により回折効率の変化について観察した。ある程度の範囲内で、液晶濃度が高いほうが形成した回折効率も高く、25℃の時液晶分子にとって一番適する温度であって、この時の回折効率が一番高い。他の条件が同じなら、回折効率は

$$\eta = \tanh^2(\pi n_1 d / \lambda \cos \theta_0)$$

なので、もっと厚いスペーサーを利用することにより、回折効率の向上を目指す。

## 第3章 HPDLC を用いた波長フィルタに関する研究

### 3.1 HPDLC を用いた回折型光スイッチの作製

#### 3.1.1 はじめに

前述した通り、HPDLC は液晶層と高分子層の屈折率差を利用する回折格子である。電圧を印加しない時、回折が生じ、電圧を印加すると、液晶層の屈折率が常光屈折率になり、高分子層の屈折率とほぼ同じなので、回折光が消失して、そのまま透過する。本節では、透過型の薄い回折格子を作製し、PDLC による回折格子の基本特性を調べた結果を説明する。

#### 3.1.2 試料の構造及び作製

本研究では、低分子液晶 5CB、フोटポリマー NOA65 と増感剤ローズベンガルを 68.5 : 30 : 1.5 の重量比で混合したものを、2 枚の基板で挟み、これを試料とした。電圧を印加するため、基板には ITO コートガラスを使用した。基板間隔は  $15\mu\text{m}$  とした。この試料へ、強度と偏光状態の等しい、互いにコヒーレントな 2 光波を照射することで、1 次元格子構造を有する HPDLC の作製を試みた。光源には波長 633 nm の He-Ne レーザーを使用して、強度はともに  $890\text{ mW/cm}^2$ 、偏光は p 偏光とした。干渉縞の周期は、2 光波の交鎖角を調整することで  $13\mu\text{m}$  となるようにした。

液晶を用いた回折光学素子の作製としては、主にガラスセル作製、試料の注入、干渉露光の 3 工程に分けることができる。これらについて以下に説明する、まず、ガラスセル作製は、次のような工程からなる。

##### 1. サンプルカット

縦 10mm、横 20mm のサイズになるよう、ダイヤペンを用いて反面に傷を付けることでカットを行う。基板洗浄の際にカットした部分で手を切りやすいので、カット部分はやすりを使って削る。

その後、基板洗浄を以下の手順で行う。

- ・洗剤を使い、手で擦って洗う
- ・洗剤をよく流した後、きれいなスポンジでこする。これは洗剤を落とすために行う
- ・再度よく水道水で流してアセトンにつけ、超音波洗浄を 20 分行う。この際、アセトンが蒸発しないよう、ビーカーにアルミをかぶせる。
- ・アセトンを純水で洗い流して、ドライオーブンで  $100^{\circ}\text{C}$ 、1h 乾かす

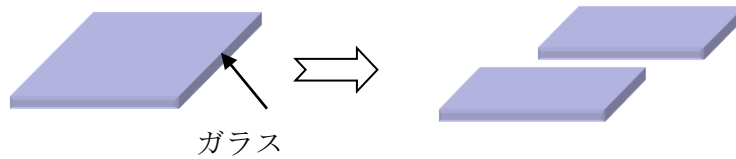


図 3.1 サンプルカット

## 2. ITO 膜形成

カットした試料に、それぞれ透明導電膜を形成する。手順と条件は以下のようになる。

- スピンコート→ソフトベーク→ハードベーク

使用溶剤：ITO（技研科学：GIP-In500EA）

- スピンコート条件

1000rpm×3sec+7000rpm×30sec+2000 rpm×2 sec

- ベーキング条件

ソフトベーク：100℃\*15min(ドライオーブン：iuchi:DO-300)

ハードベーク：500℃\*20min(マッフル炉：デンケン：KDF S-70)

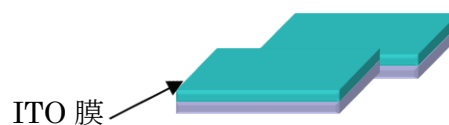


図 3.2 ITO 透明電極の製膜

## 3. ギャップ作製

材料：スペーサ（ガラスファイバ（住田光学ガラス：FT-5, Size: 5  $\mu$ m）接着剤（セメダイン株式会社：CA-185）

材料をよく混ぜ、爪楊枝で塗り、間げき作製のために必要な径のビーズ（15  $\mu$ m）を混ぜた接着剤をガラス基板の両端に4か所で塗布する、もう一方のガラス基板を重ね合わせ、上方から負荷を掛け圧着し、間げきの均一化を図る。端（片面だけ）をクリップで挟み、3時間以上放置する。

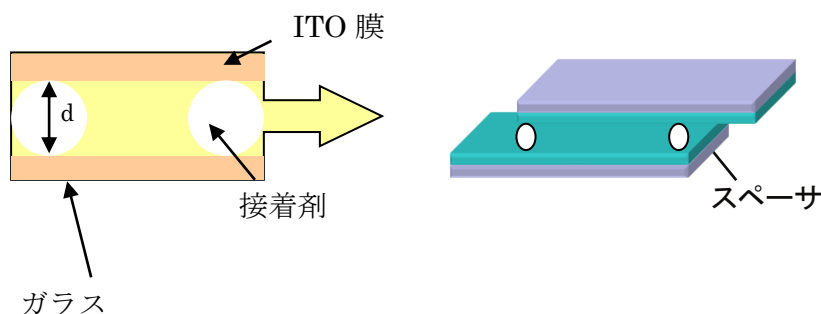


図 3.3 ギャップ作製

## 4. 電極の作製

使用溶剤：導電性エポキシ接着剤（CHEMTRONICS: CW2400）を用いて ITO 導

電膜に電極部を作製しリード線を取り出す。

注：作製したあと 1 個ずつドライオープンでベークを行う（100℃、10min）。

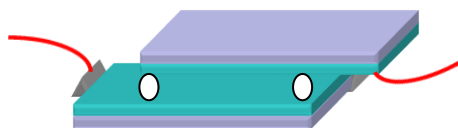


図 3.4 電極作製

次に、ガラスセルに感光材料を注入する工程について説明する  
試料(液晶低分子液晶 5CB、フォトポリマーNOA65 と増感剤ローズベンガルを 68.5 : 30 : 1.5 の重量比で混合したもの)をガラスセルの注入口に滴下する。一方の注入口からセルの対辺の開放口まで、試料を毛細管現象作用により、セル内部の全面に注入させる。

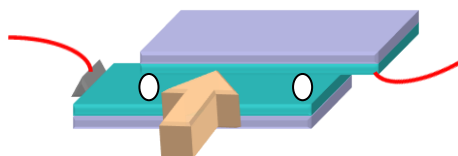


図 3.5 混合物注入

このようにして作製したサンプルセルを、レーザ干渉露光光学系中のサンプル保持台に固定し、光照射を行うことで回折光学素子の作製を行う。このレーザからの出射光をハーフミラーにより等しい光強度を持つ二つの光に分ける。この干渉光学系において、 $\lambda/2$  板を調整しレーザの偏光方向を変化させた場合は、ハーフミラーで分けた後のそれぞれのレーザビーム強度を光パワーメータで測定し、等しい強度が保たれていることを確認している。

### 3.1.3 実験系の設計

液晶分子は、ディスプレイの表示原理にも利用されているように電界により配向状態が変化する。また、前に述べたように、電圧印加すると、液晶層と高分子層の屈折率差が小さくなる。すなわち、反射率が小さくなる。これで、同じ波長の光に変調できる。

ピーク以外の光をできるだけ透過させないようにするのは、各層間の屈折率差が大きい方がいいためである。

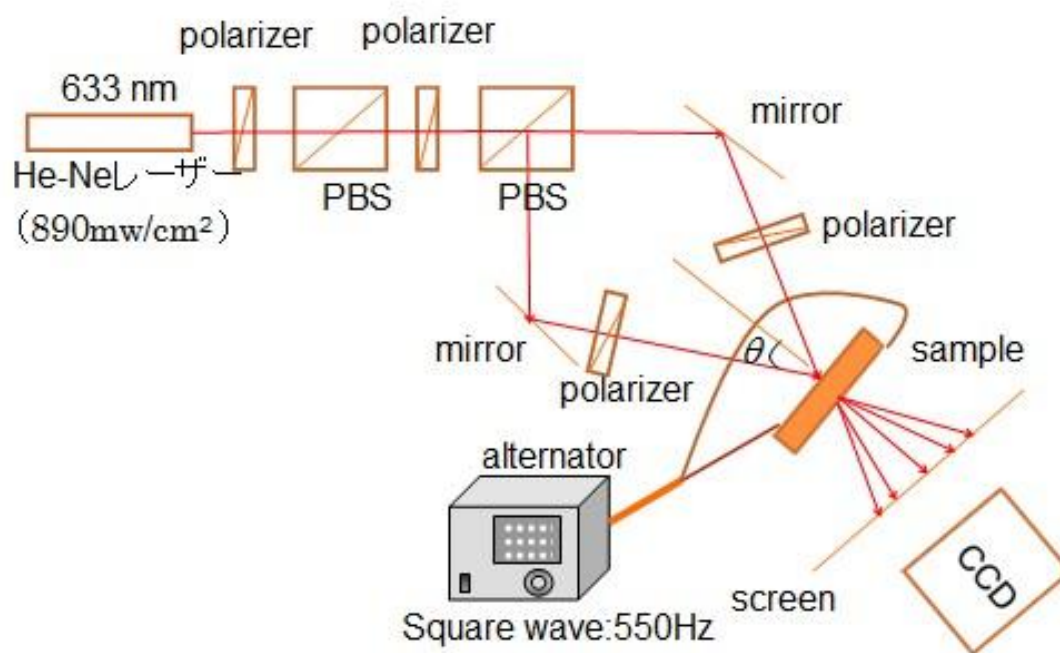


図 3.6 光スイッチの実験系

He-Ne レーザーを光源として、光を入射させる。左の偏光子と PBS で光の強度を調整する。右の偏光子と PBS で s 偏光と p 偏光という二つのコヒーレント光に分けて、干渉の実験をする。それぞれの光線で、 $\lambda/2$  の偏光子を利用して、p 偏光に調整した。2 つの光が試料の同じ側に入射するので、透過型の回折格子が出来る。入射角度は  $1.8^\circ$  であるので、薄いホログラムになって、多重回折が起こる。スクリーンを利用して回折光を記録して、プログラマブル交流電源(エヌエフ回路設計ブロック：EC1000S)で電圧を印加して、CCD で回折光の変化過程の写真を撮る。

これから実験で p 偏光にした原因を説明する。

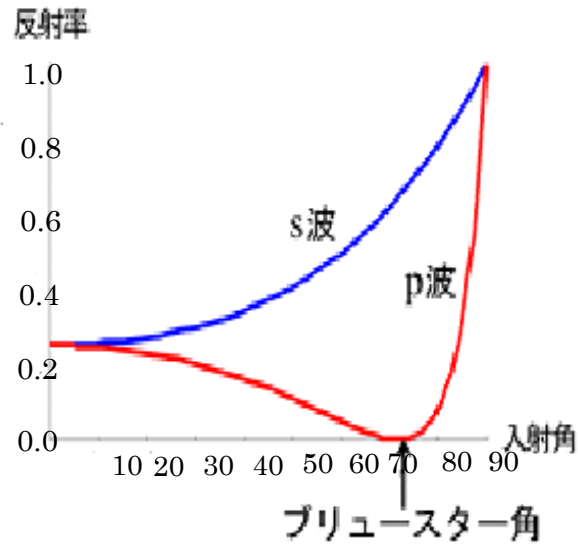


図 3.7 s 偏光と p 偏光の反射スペクトル(屈折率  $n_1=1.0$ 、 $n_2=1.5$  における反射率)

図で見ると、ある角度で p 偏光の反射率が 0 になり、光がすべて透過する。本実験で使用した増感剤 RB は光源の波長 633nm に対して、わずかな光を吸収する。それで、すべての光を透過するため、p 偏光に調整した。また、液晶部全体の常光屈折率  $n_o$  と高分子部の屈折率  $n_p$  がほぼ一致するように液晶の種類と高分子の種類の組み合わせを適宜設定することで、s 偏光の入射光に対しては液晶層全体の常光屈折率  $n_o$  と高分子層の屈折率  $n_p$  の差を感じないため回折せず、p 偏光の入射光に対しては液晶層全体の異常光屈折率  $n_e$  と高分子層の屈折率差を感じて回折するような偏光選択性ホログラムが得られる[17]。

## 3.2 HPDLC を用いた回折型光スイッチの観察

### 3.2.1 電圧印加特性

二つの記録光が試料の両側に入射すると、透過型の回折格子が出来る。角度が  $1.8^\circ$  になるため、薄いホログラムになり、多重回折が起こる。自分で作った干渉縞から回折格子が出来て、それを自分自身で回折してしまうということから、自己回折になる。どういう物かという、非線形光学媒質中に2つ以上の光束を入れると、その光同士で媒質中に干渉縞が発生する。そして、非線形媒質の場合にはそれにより、屈折率や吸収の分布が生じる。すると、それはまさに回折格子になるので、今度は入射している光が自分の光で出来上がった格子によって回折するという現象が起きるわけである。四光波混合、二光波混合などはまさにその典型的な例である。具体的な過程は以下の図に示す。

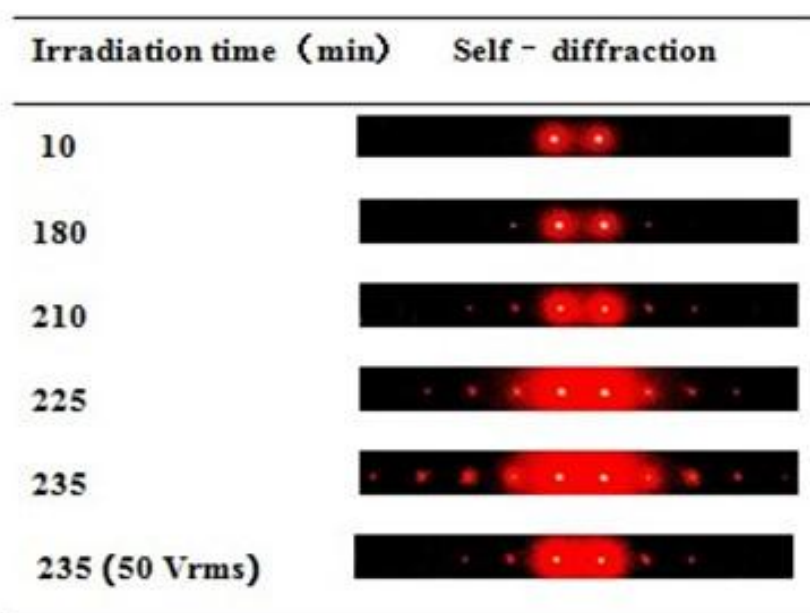


図 3.8 自己回折の形成過程(RB)

図に自己回折の観察結果を示す。この図を見ると、180 分程度照射した際、1 次の回折が目視により確認された。その後照射を続けることで、4 次光まで観察することができた。235 分照射した後、50 Vrms の電圧(550 Hz、矩形波)を印加した結果、3 次光と 4 次光が消失した。これにより、形成した格子の回折特性を電圧により制御可能なことが分かった。



### 3.1.4 周期構造の観察

235 分照射した試料の顕微鏡観察写真を示す。

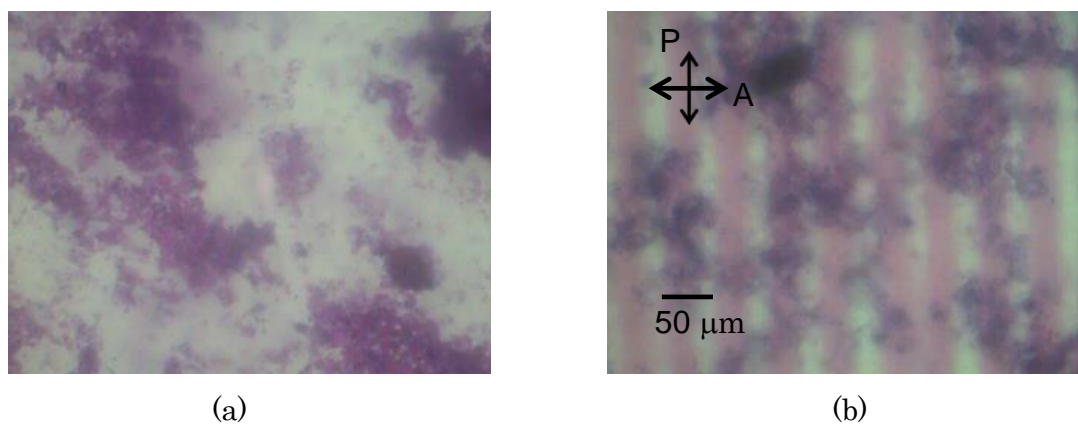


図 3.9 光が照射しなかったところと照射したところの写真(RB)

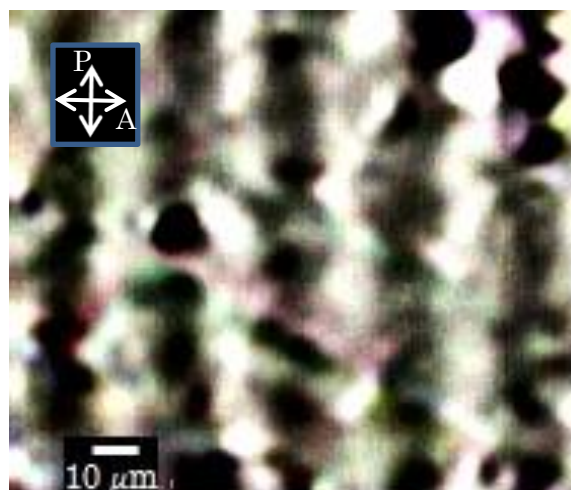


図 3.10 光が照射したところの処理した画像

これらの図で見ると、光が照射する時、ポリマーとローズベンガルは反応して、色が変わるが、液晶とローズベンガルは反応しないので、色に変化しない。そのため、色が付いているところが高分子領域、ついてないところが液晶領域であると考えられる。増感剤 RB の利点としては吸収による干渉光強度の減衰が小さいため、膜全域に渡って比較的均質な格子が形成される。欠点としては 633nm の光をわずかに吸収するので、時間がかかる。これで、増感剤 CV を利用して、もう一回回折型光スイッチの実験をした。

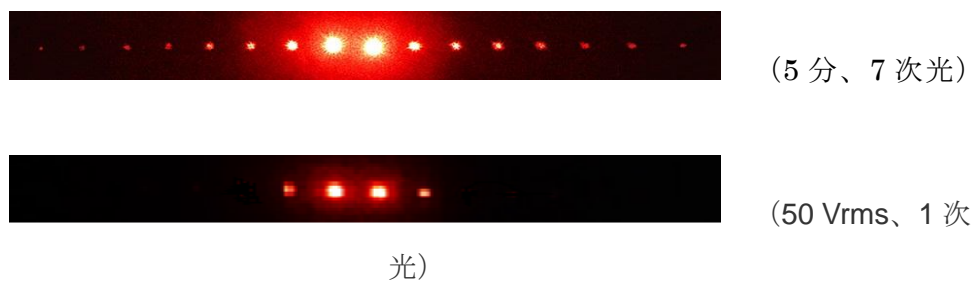


図 3.11 自己回折の形成過程 (CV)

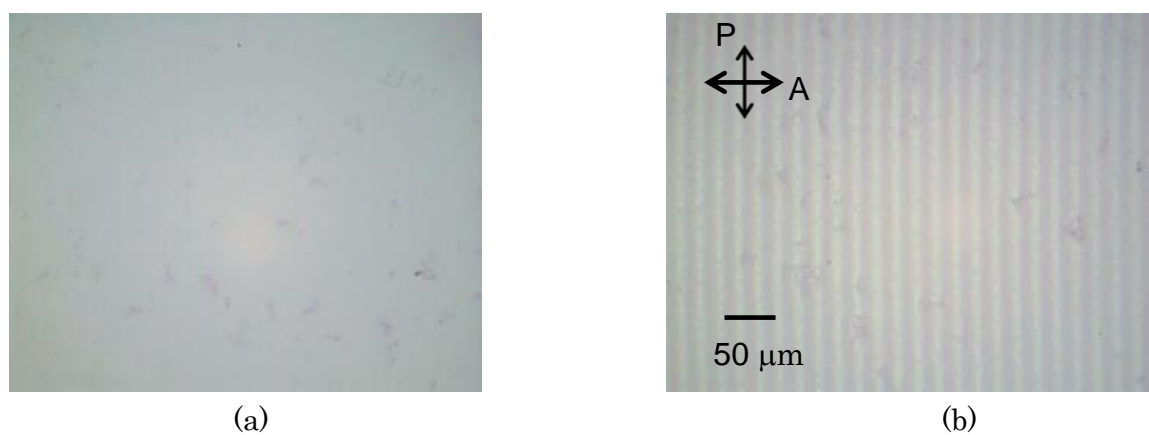


図 3.12 光が照射しなかったところと照射したところの写真 (CV)

図から見ると、干渉縞の周期とほぼ同じな周期構造が出来たことがわかった。増感剤 CV の利点としては光に敏感なので、応答時間が早い。欠点としては吸収による減衰が大きいので、量が少ないなら、厚いホログラムが出来ない。

### 3.3 HPDLC を用いた波長フィルタの評価

#### 3.3.1 実験系の設計

波長フィルタの実験系は光スイッチとほぼ同じであるが、二つの光は試料の両側に入射するので、透過型の回折格子ではなく、反射型の回折格子を作る。

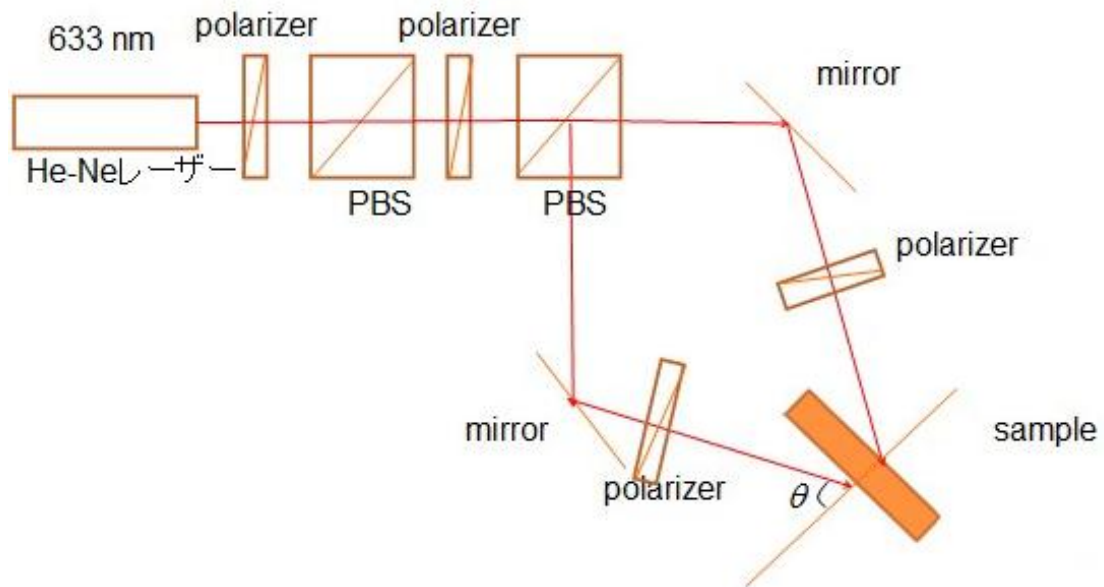


図 3.13 波長フィルタの実験系

2.2.5 の計算により、入射角は  $42.7^\circ$  になる。実験の時、分度器を利用して、角度を測ったので、誤差があると考えられる。

### 3.3.2 波長フィルタの光学特性の評価方法

波長フィルタの評価方法は昨年と同じで、分光光度計を使用して、評価する。3.1.2で述べた作製手順によって作製した試料に光を入射し、液晶セルに電圧を印加させることで透過特性の変化を測定する。測定は分光光度計（島津製作所：UV-3101PC）を用いた。分光光度計の試料室に偏光板と試料をセットに設定した。また、試料にマルチプログラマブル交流電源(エヌエフ回路設計ブロック：EC1000S)を接続する。そしてプログラマブル電源から矩形波 ( $f=550\text{Hz}$ ) の電圧 ( $V_{p-p}=0\sim30\text{V}$ ) を印加する。なお、偏光板を通して電界方向と平行方向と垂直方向となるよう偏光方向を調整する。光学測定系は図 3.14 に示す。

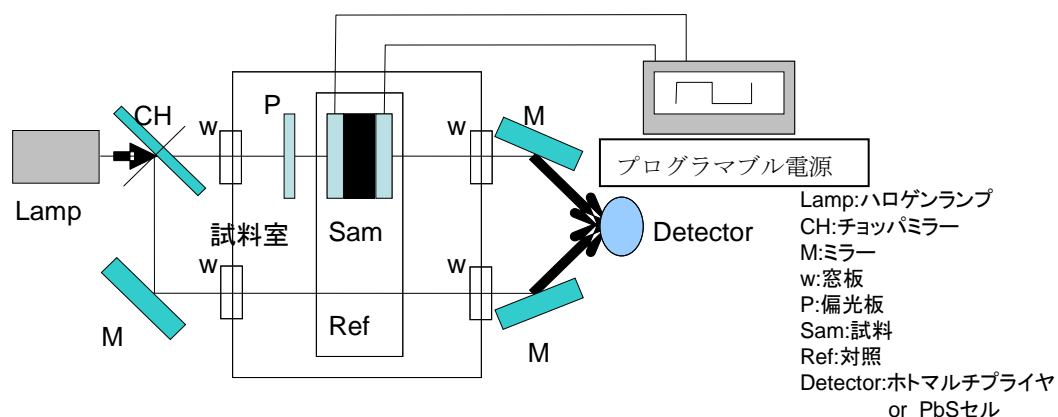


図 3.14 波長フィルタ測定系

### 3.3.3 波長フィルタの光学特性評価結果

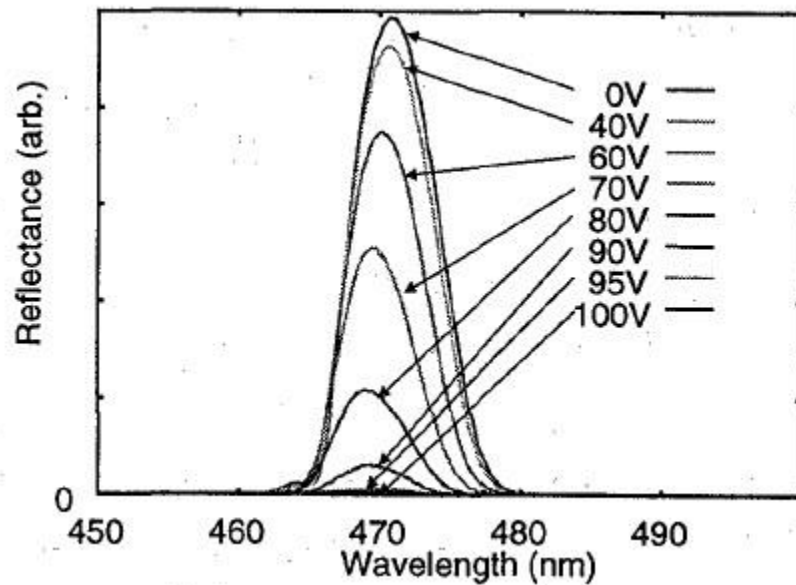


図 3.15 反射光のスペクトル（文献値[18]）

本実験でよい結果を得られなかった。原因としては、回折効率が低い以外、分度器で角度を測ったので、実験する時の誤差があると考えられる。もっと精密な実験系が必要となる。今後回折効率に対し、様々な影響要素を検討して、一番いい条件を探して、100%の回折効率を目指す。ここでは、一応文献値を載せて説明する。HPDLCでは、液晶滴が周期的に分布しているためブラック反射により入射光の特定波長成分が選択的に反射される。電界を加えると反射が消失し透明になるので、他の波長成分に影響を与えず特定の波長成分のみを変調できる。これにより、制御が容易になる。

### 3.3.4 可変波長フィルタへの応用

ホログラムに対して参照光と反対方向から入射するようにして記録されたホログラムは、白色光による照明でも再生可能な波長領域を選択して再生を行う性質がある。

1つの回折格子を記録するなら、電圧印加により、液晶層と高分子層の屈折率差が小さくなるので、回折効率も低下する。この場合は、入射角が一定の時、選択反射波長が1つだけで、変わらないで、ただ反射率が変わる。もし体積ホログラムで2つの回折格子を記録するなら、それぞれの方向が違って、2つの特定の波長の光を入射すると、入射光は2つの回折格子に違う方向で回折される。それで、波長分散できる。同じ原理で、もし多数の回折格子を記録するなら、多数の波長の光に波長分散できる。これは体積ホログラム WDM 素子の基本原理である[19]。

### 3.3.5 多層膜を用いた可変波長フィルタとの比較

昨年多層膜を用いた可変波長フィルタの作製を行ったが、これは液晶の複屈折を利用して、印加電圧値により、ピーク波長は短波長側にシフトした。これで、選択透過のピーク波長は電圧制御できることがわかった。作製した液晶セルの透過スペクトル、ピーク波長のシフトの様子を示す。測定波長は、共振ピークが現れる 1300～1700nm とした。なお、図 3.16(a)に異常光に対する透過スペクトルを、図 3.16(b)に常光に対する透過スペクトルを示す。

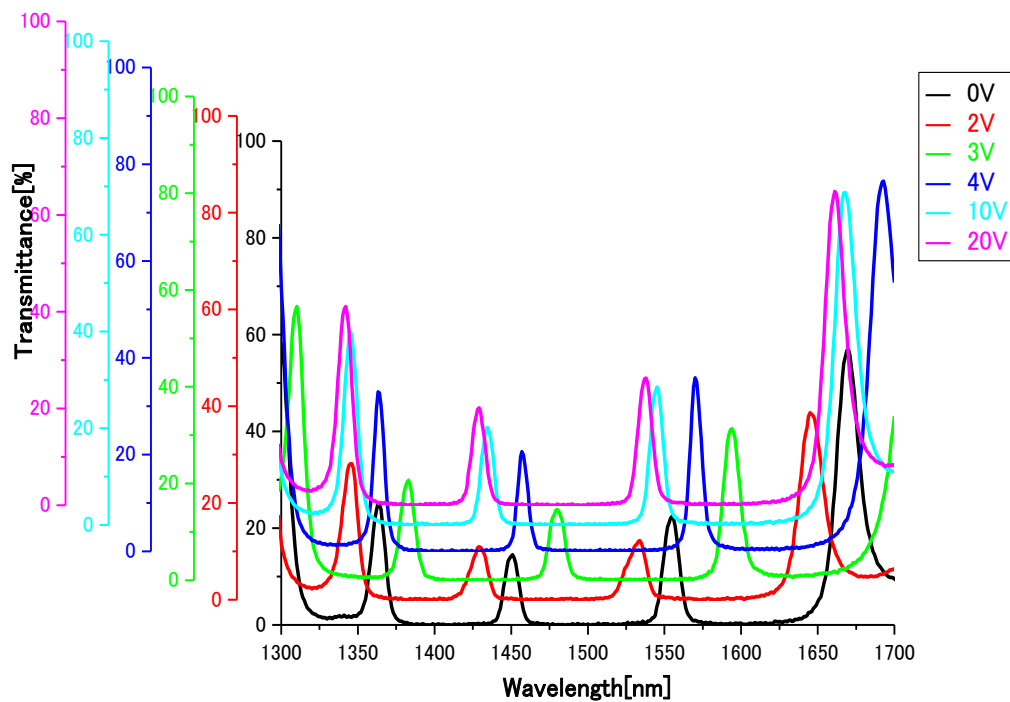


図 3.16(a) 液晶セルの透過スペクトル（異常光、印加電圧 0～20V）

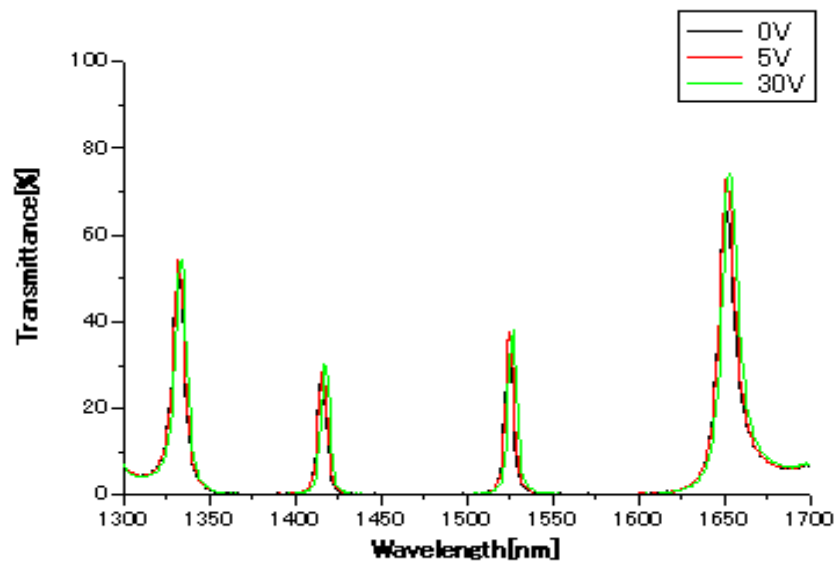


図 3.16(b) 液晶セルの透過スペクトル（常光、印加電圧 0～30V）

これに対し、HPDLC を用いた波長フィルタは、波長のシフトではなく、同じな波長の光の反射率を変調する。他の波長成分に影響を与えず特定の波長成分のみを変調できる。これで、3 原色の素子を積層することにより混色可能であり、光利用効率の高い表示が実現できると考えられる。



### 3.4 まとめ

本章では、HPDLC を用いた回折型光スイッチの作製、観察および HPDLC を用いた波長フィルタの評価を説明した。まず、自己回折について、180 分程度照射した際、1 次の回折が目視により確認された。その後照射を続けることで、4 次光まで観察することができた。235 分照射した後、50 Vrms の電圧(550 Hz、矩形波)を印加した結果、3 次光と 4 次光が消失した。これにより、形成した格子の回折特性を電圧により制御可能なことが分かった。照射した後の試料を偏光顕微鏡で構造を観察すると、周期は 20  $\mu\text{m}$  の周期構造をみることができた。また、ポリマーとローズベンガルは重合反応が起こって、色が変わるが、液晶とローズベンガルは重合しないので、そのまま析出される。そのため、色が付いているところが高分子領域、ついてないところが液晶領域であると考えられる。

回折効率にとって、様々な影響要素があるので、いちいち考えて、一番高い回折効率がほしいだが、結局 40%の回折効率が得た。今後も照射時間や照射強度により回折効率の変化を観察して、一番いい条件で高い回折効率が目指す。

## 第 4 章 結言

本研究では液晶の性質に着目し、低電圧・低消費電力、小型化が見込めるデバイスの品質・機能性の向上を目的として、光通信デバイスへの応用を検討している。光通信デバイスには波長分割多重通信で使用する波長フィルタ、回折型光スイッチの試作を行った。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べた。

第 2 章では、液晶材料について紹介して、HPDLC に関する理論も説明した。また、HPDLC を使用した光通信デバイスとして、波長フィルタの設計構成と原理について述べた。昨年は、 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  多層膜を rf スパッタリングによって成膜し、光通信において使用される波長 1550nm 帯でストップバンドを形成するようブラッグ反射の条件を計算して設計を行った。この多層膜をミラーとして使用したファブリーペロー共振器を作製し、特定の波長のみを透過する素子を作製した。共振器のギャップに液晶を注入し、電圧印加によって配向を制御し屈折率変化を生じさせることにより可変波長フィルタを作製したが、多層膜の作製やラビング処理などの工程が複雑なので、本研究では、ラビング処理をしない、ただ干渉だけで、HPDLC を用いた波長フィルタの作製を行った。作製した波長フィルタは電圧印加することにより制御できる。

第 3 章では、HPDLC を用いた回折型光スイッチの作製、観察および波長フィルタの評価を述べた。光スイッチは薄いホログラムで作るので、多重回折が起こる。実験により、増感剤 RB を利用したら、235 分後 4 次光まで観察した。50 Vrms の電圧を印加したら、3 次光と 4 次光がなくなった。これで、回折光の動作は電圧印加することにより制御できることがわかった。増感剤 RB は時間がかかるので、増感剤 CV を利用して、もう一回回折型光スイッチの実験をした。実験により、5 分後 7 次光まで観察した。50 Vrms の電圧を印加したら、1 次光まで観察した。顕微鏡の写真により、干渉縞の周期とほぼ同じの周期構造ができたことがわかった。光スイッチへの応用が可能である。照射したの試料を偏光顕微鏡で観察すると、干渉縞に対応した周期構造を観察できた。今後様々な原因を検討して、駆動電圧の低下を目指す。

100%の回折効率が得るため、液晶の濃度と温度により回折効率の変化を観察した。他の条件が同じなら、公式

$$\eta = \tanh^2(\pi n_1 d / \lambda \cos \theta_0)$$

により、干渉縞の厚さを増加して、回折効率も高くなるので、本実験で、50  $\mu\text{m}$  のフィルムスペーサーを利用して、実験をした。今後他の影響要素も検討して、100%の回折効率を目指す。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、的確で丁寧なご助言、ご指導をして頂き、充実した研究環境を与えてくださった花泉修教授に心から感謝いたします。また実験を通して様々な知識を身につけさせてくださり、発表に関してもご指導頂き大変感謝しております。

本研究を行うにあたり、基本的な知識を身につけて下さり、丁寧にご指導をして頂き、的確なご助言をして下さった三浦健太准教授に心から感謝いたします。

本論文の作成に当たり、お忙しい中審査をしてくださった、高橋佳孝准教授に感謝いたします。

本研究を行うにあたり、理論から実際のサンプル作製方法までご教授くださった佐々木友之助教に心より感謝いたします。多くの資料をご提供いただき、液晶について学びながら実験を進めることができました。

本研究を行うにあたり、実験装置部品の工作など様々な要望に応じてくださった野口克也技術専門職員研究に心から感謝しております。

日々の研究を行うにあたり、実験のサポートをして下さった修士2年の薛瑋氏、修士1年の早川愛乃氏、サラーハジャービンティアブドル カリム氏、学部4年のインタンジズワ二氏心より感謝いたします。

本研究を行うあたり、共に研究に打ち込み、研究生活や学生生活を有意義なものにしてくださった、花泉研究室の緒先輩方、同期院生、後輩の皆さんに心より感謝いたします。

最後に学生生活が有意義になるよう陰で支えてくれた両親に心から感謝いたします。

本研究は多くの方のご助言・ご指導のもとなされたものであり、様々な面で力をお貸し頂いたすべての方に心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 町田裕貴 “液晶を用いた波長可変フィルタと光導波路の設計と作製に関する研究” 修士論文 2010 年
- [2] 黒川 隆志、南條 光章 “先端光エレクトロニクス シリーズ 12 光機能デバイス” 共立出版株式会社 pp.29-33
- [3] Oleg P. Pishnyak, Oleg D. Lavrentovich *Applied Physics Letters* **89**, 251103
- [4] 佐々木 昭夫 「液晶エレクトロニクスの基礎と応用」 株式会社オーム社 pp.4-5
- [5] 吉野勝美 武田寛之 「フォトリソグラフィの基礎と応用」 コロナ社 pp.165-184
- [6] 北村道夫 「第 18 章 ネマチック液晶の電気・光学応答 LCD 設計役立つ基礎理論と数値解析手法 (その 1)」 『液晶化学実験入門』シグマ出版 pp.195-206
- [7] P.ハリハラン 著「ホログラフィの原理」 オプトロニクス社 2001 年
- [8] 久保田敏弘 著「ホログラフィ入門」 1995 年
- [9] 辻内順平 著「ホログラフィ」 1997 年
- 岡野光治、小林駿介 編 「液晶・基礎編」 培風館 1985 年
- [10] 「光学のすすめ」編集委員会 編集「光学のすすめ」 オプトロニクス社 1997 年
- [11] Y.J.Liu, X.W.Sun “Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystals : Materials, Formation, and Applications,” Hindawi Publishing Corporation *Advances in Opto Electronics* Volume, pp.3-11, 2008
- [12] K. Mimura and K. Sumiyoshi, “Optical calculation of Holographic Dispersed Liquid Crystal (HPDLC),” *IEICE Technical Report*, **97**, 57(1998)
- [13] 尹德金 “高效全息聚合物分散液晶 Bragg 光栅制备研究” 2009
- [14] 郑继红, 顾玲娟, 庄松林, 沈国土, 杨宝成 “聚合物分散液晶体全息光栅在 1550nm 波长处选择性模拟” *上海理工大学学报* Vol.28, No.4, pp.360-362, 2006
- [15] 郑继红, 陈刚, 顾玲娟, 裘颖刚, 庄松林 “新型聚合物分散液晶材料研制的电控体全息光栅” Vol.23, No.4, pp.491-493, April, 2003
- [16] 河合滋 「光学設計のための基礎知識」 オプトロニクス社 2006 年 3 月
- [17] ポリマー分散液晶型の偏光選択性ホログラム素子及びその製造方法 特許文 pp.3-5
- [18] 伊達宗和 “ホログラフィック高分子分散液晶 (HPDLC) による反射型表示” *電子情報通信学会* 1999 年
- [19] 加藤謹矢、田中敬二、伊達宗和 “反射型カラー液晶表示技術” *電子情報通信学会論文誌* Vol.J81-C-II, No.3, pp.337-339 1998

## 付録 回折格子とホログラムの関係

ホログラムの波面再生は、回折格子に光波回折の観点から説明することもできる。記録面上の信号波と参照波を振幅分布関数  $A$  ( $\geq 0$ ) と位相分布関数  $\Phi$  を用いて

$$S(x,y,0)=A_s(x,y)\exp\{-j\Phi_s(x,y)\} \quad (1.1a)$$

$$R(x,y,0)=A_r(x,y)\exp\{-j\Phi_r(x,y)\} \quad (1.1b)$$

のように表示すると、ホログラムの透過率分布を表す式右辺の波面再生に寄与する第 2 行目の 2 つの項は

$$\begin{aligned} & -t_1\{S(x,y,0)R(x,y,0)^* + S(x,y,0)^*R(x,y,0)\} \\ & = -2t_1 A_s(x,y) A_r(x,y)\cos\{\Phi_s(x,y)-\Phi_r(x,y)\} \end{aligned} \quad (1.2)$$

と表される。上式は、ホログラムが  $\cos \{ \}$  の因子で表されるような周期的な干渉縞構造となっており、信号波の振幅絶対値  $A_s$  は島のコントラスト(明暗振幅)の形、位相  $\Phi_s$  は縞の周期と位相(縞の位置)の形で記録されていることを表している。

自由空間中の任意の光波は平面波で展開できるから、ホログラム記録時の信号波も平面波の重ね合わせであると考えることが出来る。そこで、参照波として平面波を用いる場合を考え、信号波についてはある 1 つの平面波成分に注目すれば、ホログラム記録は 2 平面波の干渉の記録である。光波の波長を  $\lambda$ 、信号波と参照波の波動ベクトルが  $xz$  面内にあるとしてその方向角をそれぞれ  $\theta_s$ 、 $\theta_r$  とすれば

$$\Phi_s(x,y) = (k\sin\theta_s) x, \Phi_r(x,y) = (k\sin\theta_r) x, k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.3)$$

であるから、これを式(1.2)に代入すれば、この干渉縞成分は

$$\Lambda = \frac{\lambda}{|\sin\theta_r - \sin\theta_s|} \quad (1.4)$$

の周期を持つグレーティングとなっていることがわかる。再生時には照明波として、記録時参照と同じ波長  $\lambda$ 、伝搬方向  $\theta_r$  の平面波をこの回折格子に入射する。この時回折の公式から

$$\sin\theta_d = \sin\theta_r \pm \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1.5)$$

で決まる角度  $\theta_d$  の 1 次回折波が生じるが、式(1.4)、(1.5)からこの角は信号波成分の角  $\theta_s$  に等しく、信号波成分が再生されることがわかる。

物体情報を含む実際のホログラムは、このような回折格子を重ね合わせたものと考えることができる。全体の回折波は平面波成分を重畳したものとして信号波を再生する。また、ホログラムを面内の各位置で周期と間トラストが異なる回折格子と考えてもよく、この時は各位置からの平面波の波動成分により全体の回折はが形成されることになる。